



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu



Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?

Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties
van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren

Frans Klijn
Mark Hegnauer
Jules Beersma
Frederiek Sperna Weiland

Deltares en KNMI

september 2015



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Deltares

Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?

**Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van
nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren**

Frans Klijn, Mark Hegnauer, Jules Beersma, Frederiek Sperna
Weiland

Deltares en KNMI

september 2015

1220042-004

Inhoudsopgave

Ten geleide en de belangrijkste boodschappen	3
Aanleiding	5
Wat is er nieuw aan KNMI'14?	5
Hoe zijn de rivierafvoeren berekend?	7
Wat zien we veranderen in het afvoerregime van Rijn en Maas?	8
Hoe werkt de klimaatverandering door in het voorkomen van extreme hoogwaters?	10
Extreme neerslag	10
Hoe ontwikkelen de mogelijke hoogwaterafvoeren zich?	11
Komen die afvoeren wel in Lobith en Borgharen aan?	14
Wat gebeurt er met de laagwaterperioden?	18
Belangrijkste verschillen ten opzichte van eerdere studies	20

Ten geleide en de belangrijkste boodschappen

- Op verzoek van het Ministerie van I&M is verkend wat de nieuwe KNMI'14 klimaatscenario's betekenen voor het afvoerregime van de Rijn en de Maas, in het bijzonder voor (extreme) hoogwaterafvoeren en laagwaterperioden.
- Er zijn in aansluiting op de klimaatscenario's voor Nederland (KNMI'14) vijf scenario's gemaakt voor de stroomgebieden van de Rijn en de Maas. Het onderzoek is gedaan met behulp van het GRADE-instrumentarium (*Generator of Rainfall and Discharge Extremes*), dat in de afgelopen decennia is ontwikkeld en recent is geaccepteerd als basis voor het afleiden van de kans op extreme rivierafvoeren.
- De resultaten van dit onderzoek zijn zuivere berekeningsresultaten. Dat betekent dat ze niet zonder meer direct kunnen worden vertaald in toets- of ontwerpwaterstanden. Bij het Wettelijk ToetsInstrumentarium (WTI) en het OntwerpInstrumentarium (OI) wordt immers nog op een specifieke wijze rekening gehouden met onzekerheden (modelonzekerheden en onzekerheden over eventuele grootschalig gebruik van zandzakken of vergelijkbare tijdelijke beschermingsmaatregelen in Duitsland).
- In alle klimaatscenario's wordt het veel natter, gemiddeld, maar vooral in de winter. In de zomer wordt het in de meeste scenario's iets droger, in een enkel scenario wordt het veel droger.
- In alle scenario's wordt het afvoerregime van de Rijn en de Maas door het jaar heen grilliger. De winterafvoeren nemen toe, de zomerafvoeren nemen af. In de Rijn is dat laatste beperkt het geval, doordat het Rijnstroomgebied heel groot is, met veel demping door onder andere de grote meren. In de Maas wordt het verschil tussen winter- en zomerafvoeren veel groter.
- De nieuwe scenario's leveren het beeld op dat het over het geheel genomen (nog) natter kan worden dan al eerder was voorzien, maar dat het in de zomer tevens (iets) minder droog wordt dan eerder verwacht.
- Alle scenario's wijzen op sterk toenemende hoeveelheden extreme neerslag in de stroomgebieden, die al in 2050 veel grotere rivierafvoeren genereren.
- Als wordt verondersteld dat de dijken in Duitsland oneindig hoog zijn kan de Rijnafvoer bij Lobith met een kans van optreden van 1: 1250 per jaar toenemen van circa 17.000 m³/s nu tot 19.000 a 20.000 m³/s in 2050. Voor 2085 lopen de scenario's verder uiteen, tot ruim 22.000 m³/s voor een 1: 1250 gebeurtenis. Let wel: dit is de hoeveelheid afvoer die door extreme neerslag wordt gegenereerd, het is niet de afvoer die Nederland tussen de dijken kan bereiken!
- Voor de Maas loopt de 1:1250 per jaar afvoer die in het stroomgebied bovenstrooms van Borgharen wordt gegenereerd op van circa 3900 m³/s nu tot 4250 á 4450 m³/s in 2050. In 2085 lopen de scenario's verder uiteen tot circa 4750 m³/s voor een 1: 1250 gebeurtenis.
- Alles overziend neemt in alle scenario's de 1:1250 per jaar afvoer in 2050 sterk toe, doordat het in alle scenario's natter wordt.
- In 2085 gaan de scenario's voor de extreme hoogwaterafvoeren verder uiteenlopen, waarbij nog maar één scenario (W_H) boven het oude W+-scenario (KNMI'06) uitkomt. Voor de

langere termijn blijft de onzekerheid over de ontwikkeling van extreme afvoeren dus onverminderd groot.

- Voor de Rijn geldt dat grootschalige overstromingen tussen Bonn en de Nederlandse grens leiden tot aftopping van extreme afvoeren. Als hiermee rekening wordt gehouden blijkt dat al in de huidige situatie de rivierafvoer effectief wordt afgetopt vanaf circa 14.000 m³/s, en dat afvoeren boven de 16.000 m³/s in het huidige klimaat uiterst onwaarschijnlijk zijn.
- In de toekomst (in 2050 en nog duidelijker in 2085) nemen de extreme afvoeren bij Lobith echter wel fors toe, omdat de bergingscapaciteit van de Duitse beschermde gebieden tussen Bonn en Wesel dan geheel is opgesoupeerd. Bij extremere omstandigheden stijgen de maximale afvoeren bij Lobith dan ook weer, tot ongeveer 17.500 m³/s.
- Nog hogere afvoeren leiden tot het overlopen van de dijken op de laatste 20 km voor de Nederlandse grens (tussen Wesel en Lobith), met grensoverschrijdende overstromingen tot gevolg.
- De projecties voor de in de toekomst maximaal te verwachten werkelijke Rijnafvoer te Lobith lopen daardoor minder ver uiteen dan die voor de Maas te Borgharen, waar het effect van grootschalige overstromingen bovenstrooms van de Nederlandse grens zeer gering is.
- Alhoewel de toekomstprojecties voor de Rijn minder ver uiteenlopen qua maximaal te verwachten afvoer, doen ze dat juist zeer sterk qua kans van voorkomen. Frequenter hoogwater betekent ook een toename van de overstromingsrisico's, doordat de kans op het doorbreken van dijken toeneemt als deze veel vaker zwaar belast worden.
- In alle scenario's komt een afvoer van ruim 12.000 m³/s (overeenkomend met de hoogwaters van 1993 en 1995) niet langer gemiddeld eens per 100 jaar voor, maar eens per 30 jaar in 2050 en in 2085 in sommige scenario's vaker dan eens per 10 jaar. De tot nu toe maatgevende afvoer van 16.000 m³/s (waarop het Ruimte voor Rivieren-programma is afgestemd) gaat van een berekende kans van voorkomen van kleiner dan 1: 30.000 per jaar nu, naar circa 1: 2000 in 2050, en in sommige scenario's naar ongeveer 1: 500 in 2085.
- Voor wat betreft extreme laagwaterperioden zien we voor de Rijn in de meeste scenario's slechts geringe afnames van de lage rivierafvoeren, maar in het droge scenario W_{H, dry} wel 20 tot 30 % lagere laagwaterafvoeren (aan het einde van de zomer) in respectievelijk 2050 en 2085.
- Voor de Maas, die een veel variabelere afvoerregime kent met zeer lage afvoeren in de (na)zomer, wordt in de meeste scenario's verwacht dat die lage afvoeren verder afnemen; tot wel met 45% in 2050 en 60% in 2085 in het droogste scenario (W_{H, dry}).

Aanleiding

In 2013 heeft het IPCC nieuwe prognoses gepubliceerd over de klimaatveranderingen waar de wereld deze eeuw mee te maken kan krijgen. Voor Nederland heeft het KNMI meegewerkt aan deze IPCC-rapportages. De klimaatsimulaties voor deze rapportage zijn uitgevoerd met een groot aantal modellen. Het resultaat van dit zogenaamde CMIP5 is een bandbreedte van mogelijke veranderingen van het klimaat in de loop van deze eeuw.

Het KNMI heeft de nieuwste inzichten over klimaatverandering vervolgens specifiek voor Nederland uitgewerkt in de zogenoemde KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland (KNMI, 2014). Deze vervangen de KNMI'06 scenario's, die zijn en worden gebruikt voor het ontwikkelen van klimaatadaptatiebeleid. Zo zijn de KNMI'06 scenario's onder meer gebruikt om Deltascenario's af te leiden voor het Deltaprogramma. In het Deltaprogramma wordt beoogd te anticiperen op de toekomst, waarbij een hogere zeespiegel en hogere en frequentere rivierhoogwaters relevant zijn voor overstromingsrisicobeleid; en langdurig lage rivierafvoeren relevant zijn voor de zoetwatervoorziening en de bevaarbaarheid van de rivieren.

Op verzoek van het Ministerie van I&M heeft Rijkswaterstaat-WVL aan Deltares en KNMI gevraagd de implicaties van de nieuwe klimaatscenario's voor het afvoerregime van de Rijn en de Maas te verkennen, met bijzondere aandacht voor (extreme) hoogwaters en laagwaterperioden. Dat is gedaan met behulp van (onderdelen van) het GRADE-instrumentarium (*Generator of Rainfall and Discharge Extremes*). Daarover gaat deze rapportage¹.

Wat is er nieuw aan KNMI'14?

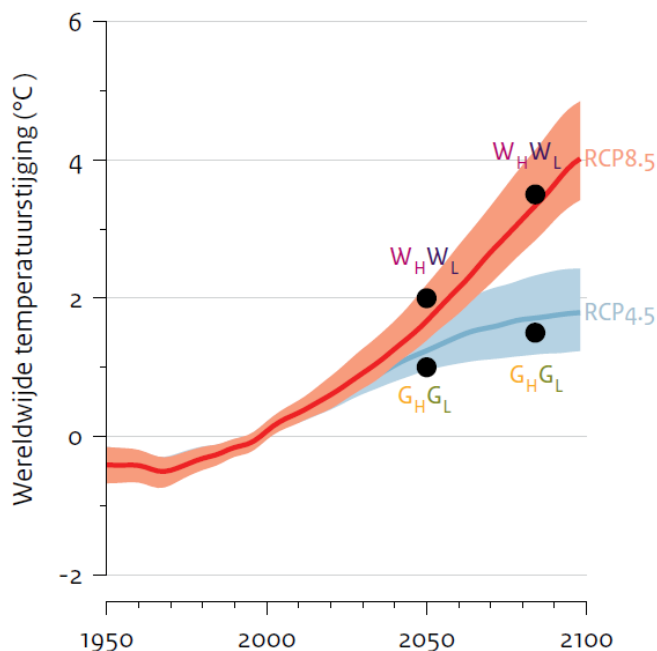
IPCC en KNMI gaan nu uit van de meest recente wetenschappelijke inzichten over de gevolgen van de toename van het CO₂-gehalte en landgebruiksveranderingen voor het systeem aarde. Deze inzichten zijn verwerkt in betere, en ruimtelijk gedetailleerdere, modellen van de circulatie in de atmosfeer en de oceanen. Voor Nederland en Europa hangen de gevolgen af van veranderingen in de wereldgemiddelde temperatuur en van mogelijke veranderingen in de luchtcirculaties. Die gevolgen zijn voor de stroomgebieden van de Maas en Rijn anders dan voor het Nederlands grondgebied. Daarom is voor deze studie niet alleen gebruik gemaakt van de vier KNMI'14 klimaatscenario's, die zijn geoptimaliseerd voor het Nederlands grondgebied, maar is nog een extra scenario gemaakt om ook de kans op extreme droogte voor de stroomgebieden van Rijn en Maas in beeld te brengen. Samen geven deze vijf klimaatscenario's een goed beeld van de bandbreedte van mogelijke toekomstige veranderingen in neerslag en temperatuur, zoals gerepresenteerd door CMIP5.

De scenario's zijn gekoppeld aan emissiescenario's van broeikasgassen. Van de vier emissiescenario's die IPCC onderscheidt (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 en RCP 8.5) wordt het lage RCP 2.6 scenario niet gebruikt, omdat dit uitgaat van onrealistisch grote emissiereducties. De bandbreedte van de overige IPCC-scenario's is met de vijf nieuwe scenario's grotendeels afgedekt. De in KNMI'14 gebruikte

¹ Deze rapportage is een samenvatting en duiding van: Sperna Weiland, F., J. Beersma, M. Hegnauer & L. Bouaziz, 2015. *Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the future discharge of the Rhine and Meuse. Report nr 1220042-000-ZWS-0004*, Deltares, Delft.

benadering zorgt er voor dat de scenario's voor de komende decennia een niet-lineair verloop hebben (zie figuur 1). In scenario G (gematigd) stijgt de wereldwijde temperatuur tot 2050 met 1°C en tot 2085 met 1,5°C. In scenario W (warm) gaat het om respectievelijk 2 en 3,5°C temperatuurstijging wereldwijd.

Binnen de scenario's G en W is vervolgens onderscheid gemaakt tussen een nauwelijks gewijzigde luchtstroming boven Nederland in de loop der seizoenen (L), versus een luchtstroming die wordt gekenmerkt door meer hoge druk boven West-Europa in de zomer (H) en vaker overtrekkende lagedrukgebieden met veel westenwind in de winter. In het vijfde, droge, scenario treedt ook grootschalige droogte op het continent op in de zomer. Dit scenario is $W_{H, dry}$ genoemd.



Figuur 1 Scenario W (warm) versnelt in de loop van de eeuw, terwijl scenario G (gematigd) afbuigt. Beide vallen binnen de bandbreedte van IPCC (RCP 4.5 en 8.5)

Hoe zijn de rivierafvoeren berekend?

De afvoerregimes van de Rijn en de Maas zijn berekend met onderdelen van het GRADE-instrumentarium² (*Generator of Rainfall and Discharge Extremes*). Het principe van dit zeer geavanceerde instrumentarium is dat voor een bepaald gegeven klimaat 50.000 jaar weersomstandigheden en rivierafvoeren kunnen worden 'gegenereerd' uit een beperkte meetreeks (van bijvoorbeeld 50-100 jaar). Daarbij worden uit gemeten weersomstandigheden situaties geselecteerd en weer gecombineerd om een nieuwe – veel langere – reeks van 'mogelijk weer' te genereren. Ook kan de lange hypothetische reeks voor het huidige klimaat worden 'getransformeerd' naar de toekomst als ware hij representatief voor het klimaat behorend bij een bepaald klimaatscenario.

GRADE kent een drietal belangrijke stappen, met voor elke stap een daarop toegesneden model:

1. Genereren van lange reeksen weersomstandigheden met de neerslaggenerator;
2. Berekenen van mogelijke rivierafvoeren met een neerslag-afvoermodel (HBV);
3. Simuleren van de voortplanting van afvoergolven door de rivier met een rivierkundig model (SOBEK).

In de neerslaggenerator worden voor alle deelstroomgebieden van de stroomgebieden van Rijn en Maas voor 50.000 jaar dagwaarden van **neerslag en temperatuur** gegenereerd. Specifiek voor deze studie heeft het KNMI niet – zoals in 2006 – de projecties van de klimaatveranderingen voor Nederland over de stroomgebieden van de Rijn en Maas uitgespreid, maar zijn voor beide stroomgebieden apart scenario's gemaakt waarbij rekening is gehouden met de ruimtelijke verschillen in de klimaatverandering.

Met het neerslag-afvoermodel (HBV) wordt berekend hoeveel water in de deelstroomgebieden tot afvoer komt en wat dat voor **het afvoerregime** op de hoofddivieren Rijn en Maas betekent. In het neerslag-afvoermodel wordt rekening gehouden met verdamping, met het feit of de neerslag in de vorm van sneeuw is gevallen en met het smelten van die sneeuw. Nieuw is dat de berekende verandering in verdamping nu niet alleen maar op temperatuur is gebaseerd, maar ook op de instraling. En ook is het model opnieuw afgeregeld (gekalibreerd aan waarnemingen).

Met het rivierkundig model wordt berekend hoe extreme afvoergolven zich door de rivierbedding verplaatsen op hun weg naar de Nederlandse grens en hoe ze daarbij van vorm veranderen (lager en breder of juist smaller en hoger worden). Met de uitkomsten van dit model wordt de overschrijdingsfrequentie van mogelijke **hoogwaterafvoeren** bij de grens berekend: respectievelijk Lobith voor de Rijn en Borgharen voor de Maas. Voor de Rijn wordt daarbij rekening gehouden met de hoogte van de dijken in Duitsland en met de bergingscapaciteit van de gebieden achter die dijken. Extreme afvoeren leiden in Duitsland namelijk tot overstromingen, waardoor hoogwaterpieken worden afgetopt.

² GRADE is wetenschappelijk uitgebreid gereviewd en beschreven, en wordt inmiddels door het ExpertiseNetwerk Waterveiligheid (ENW) aanbevolen als methode om de overschrijdingskansen van extreme hoogwaters op de rivieren af te leiden.

Wat zien we veranderen in het afvoerregime van Rijn en Maas?

Klimaatverandering leidt ten eerste tot veranderingen in neerslag en verdamping, die weer verschillen per seizoen en per deelstroomgebied. Het stroomgebied van de Rijn is zeer groot en complex, met veel grote zijrivieren (Main, Neckar, Moezel), waar dat van de Maas kleiner is en tamelijk langgerekt. Een belangrijk deel van het Rijngebied ligt bovendien in het hooggebergte, voor het Maasgebied geldt dat niet.

Een eerste analyse betreft dan ook het afvoerregime van beide rivieren. Dat geeft een goed inzicht in de implicaties van de mogelijke klimaatveranderingen in de tijd. Die analyse volgt hieronder per rivier, waarbij van tevoren wordt opgemerkt dat de KNMI'14 scenario's een beeld opleveren dat in grote lijnen overeenkomt met dat van de KNMI'06 scenario's; dat wil zeggen voor de gemiddelde afvoer. De hoge (winter)afvoeren lijken echter sterker toe te nemen dan in KNMI'06, terwijl de lage (nazomer)afvoeren juist minder sterk afnemen. Het lijkt dus nog natter te worden dan al was voorzien, maar tevens minder droog te worden dan eerder verwacht.

De Rijn

Het Rijnstroomgebied is zeer groot en divers qua opbouw. Ten eerste draagt een groot aantal deelstroomgebieden bij aan de afvoer bij Lobith. Ten tweede valt de winterneerslag in de Alpen als sneeuw en smelt pas in de loop van het voorjaar. En ten derde werken de grote meren in Zwitserland dempend op het afvoerregime, niet het minst de Bodensee op de grens met Duitsland. Als gevolg hiervan reageren de maandgemiddelde afvoeren bij Lobith niet erg heftig: de verschillen tussen zomer en winter zijn relatief beperkt. Door de klimaatverandering verandert de jaargemiddelde afvoer niet heel sterk, maar worden de verschillen tussen zomer en winter wel duidelijk pregnanter, vooral in de W-scenario's in 2085.

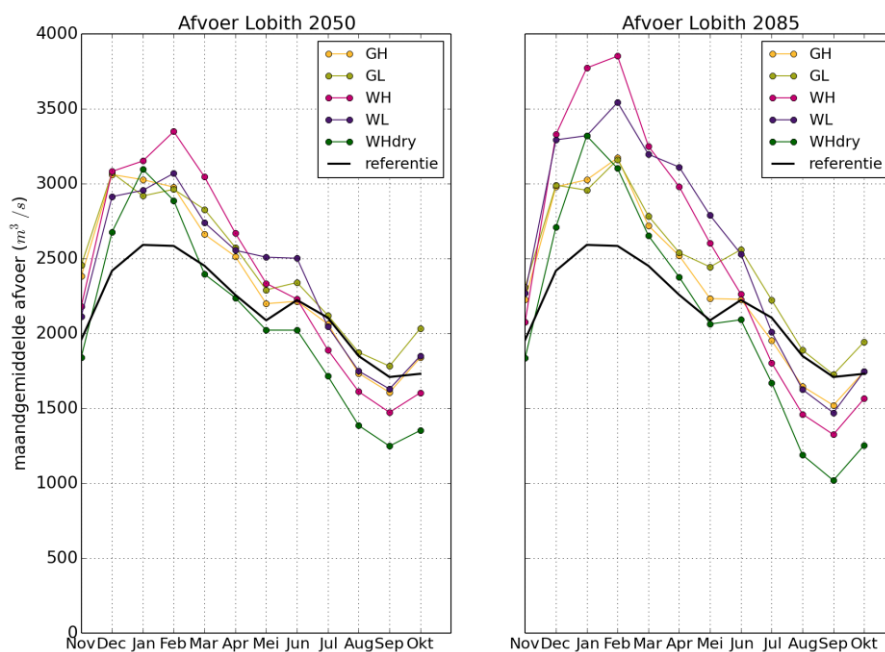
De maandgemiddelde afvoeren in de **winter** nemen in alle scenario's toe, en hier zijn in 2085 ook duidelijke verschillen tussen de verschillende scenario's te zien. De toename in Lobith varieert van 10-20% in 2050, maar voor 2085 blijven de gevolgen van de G-scenario's beperkt tot minder dan 20% toename, terwijl de W-scenario's tot bijna 40% hogere maandgemiddelde winterafvoeren opleveren.

De **laagwaterafvoeren** (maandgemiddelden) in de nazomer bij Lobith veranderen maar heel weinig en de scenario's verschillen onderling nauwelijks. In 2050 kan de verandering uiteen lopen van -20% ($W_{H, dry}$) tot +10% (G_L); in 2085 van -30% tot 0% voor respectievelijk $W_{H, dry}$ en G_L .

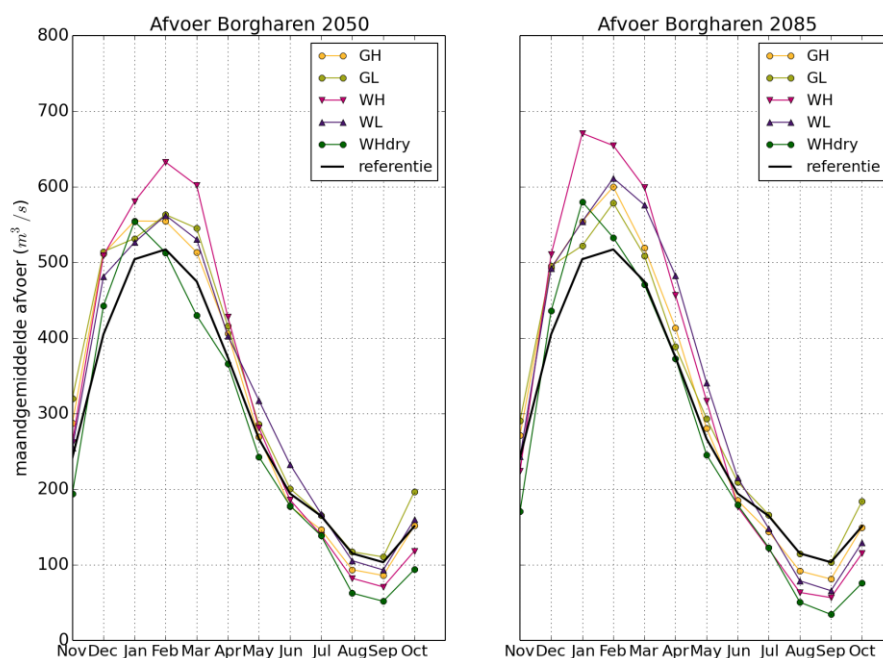
De Maas

De Maas is een regenrivier. De rivier heeft bovendien een kleiner stroomgebied met minder demping (in bodem en sneeuw).

In alle scenario's zien we de gemiddelde **winter- en voorjaarsafvoeren** procentueel iets toenemen; het sterkst in scenario W_H met maximaal bijna 20% toename in 2050 en bijna 25% in 2085. Het moment van optreden van hoogwater schuift ook iets naar voren in de tijd, doordat sneeuw door regen wordt vervangen.



Figuur 2 Afvoerregime van de Rijn in de KNMI'14 scenario's in vergelijking met het huidige afvoerregime (in zwart).



Figuur 3 Afvoerregime van de Maas in de KNMI'14 scenario's in vergelijking met het huidige afvoerregime (in zwart).

De **lage afvoeren** in nazomer en herfst nemen in de Maas echter af in de meeste, maar niet in alle scenario's. In scenario G_L neemt de gemiddelde laagwaterafvoer in het geheel niet af. In scenario $W_{H,dry}$ gaat het in 2050 echter om circa 45% en in 2085 om 60% afname van de gemiddelde laagwaterafvoer.

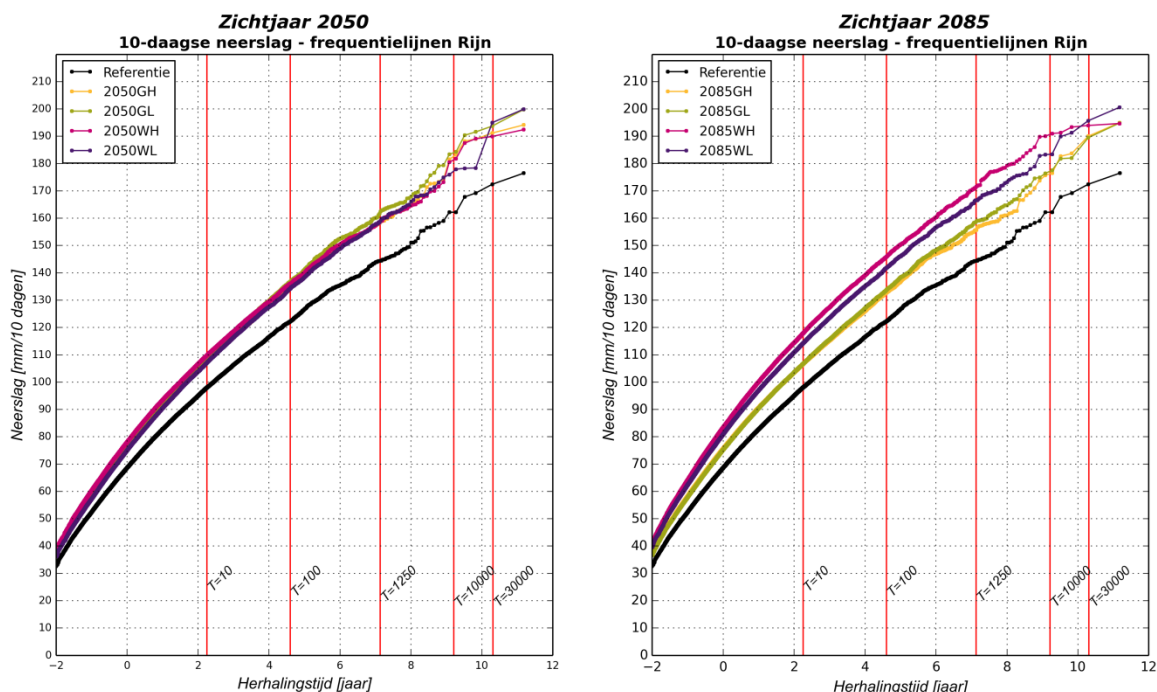
Hoe werkt de klimaatverandering door in het voorkomen van extreme hoogwaters?

Extreme neerslag

De grootste 10-daagse neerslaghoeveelheid in het winterhalfjaar is een bruikbare indicator voor neerslag die tot hoogwater op de grote rivieren kan leiden. Uit de klimaatprognoses blijkt dat in 2050 de vier voor deze analyse relevante scenario's³ tot vergelijkbare extreme neerslaghoeveelheden leiden. Dit geldt zowel voor het Rijnstroomgebied (Figuur 4) als voor het Maasstroomgebied (Figuur 5).

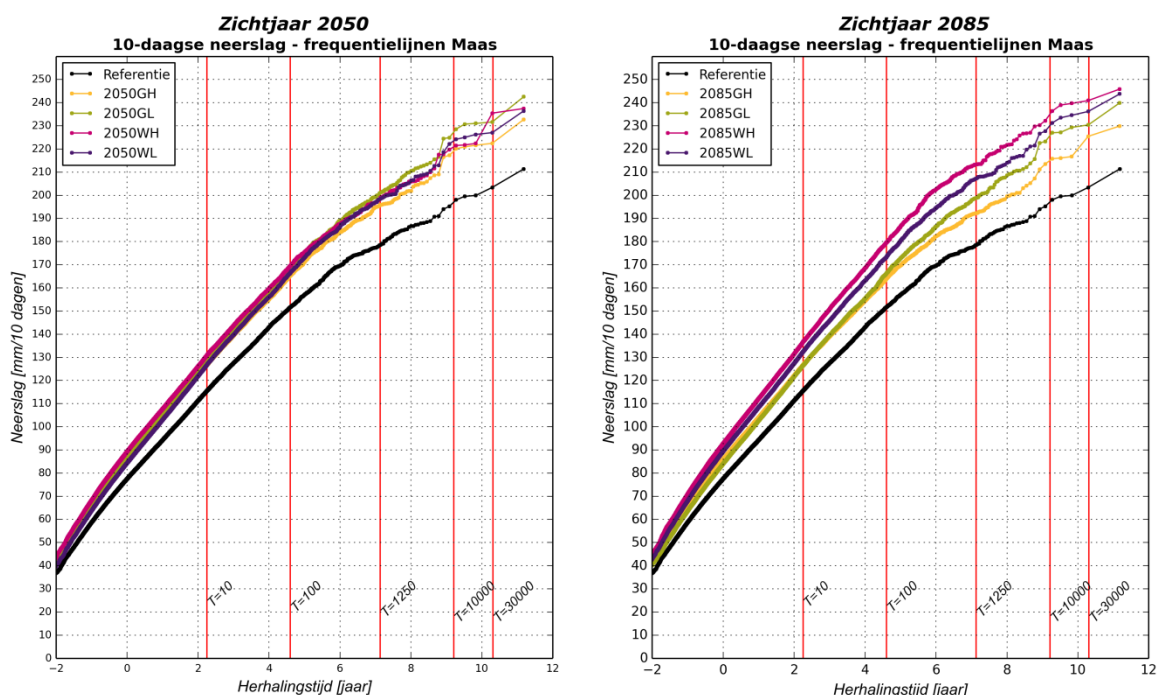
De kleine spreiding in 2050 is mogelijk te verklaren uit het feit dat de gemiddelde temperatuurverschillen tussen de scenario's weliswaar belangrijk zijn, maar dat elk van deze scenario's wel een seizoen kent waarin de neerslag bovengemiddeld sterk toeneemt. Zo heeft het gematigde scenario (G_L) juist de natste (na)zomer en heeft G_H een relatief natte herfst, terwijl W_H een zeer natte winter kent en W_L een relatief nat voorjaar. In de frequentieverdeling van 10-daagse neerslag uit zich dat in het vrijwel samenvallen van de prognoses.

In 2085 gaan de scenario's uiteen lopen. De warme (W) scenario's laten grotere neerslaghoeveelheden zien, terwijl de gematigde (G) scenario's na 2050 nog maar weinig natter worden.



Figuur 4 Ontwikkeling van de 10-daagse neerslaghoeveelheden (uitgezet tegen herhalingsjijd) in de KNMI'14 scenario's in 2050 (links) en 2085 (rechts) in het Rijnstroomgebied.

³ Voor de analyse van veranderingen van de kans op hoogwaters is scenario W_{H, dry} niet relevant; daarom worden hier slechts 4 scenario's getoond.



Figuur 5 Ontwikkeling van de 10-daagse neerslaghoeveelheden (uitgezet tegen herhalingstijd) in de KNMI'14 scenario's in 2050 (links) en 2085 (rechts) in het Maasstroomgebied.

Hoe ontwikkelen de mogelijke hoogwaterafvoeren zich?

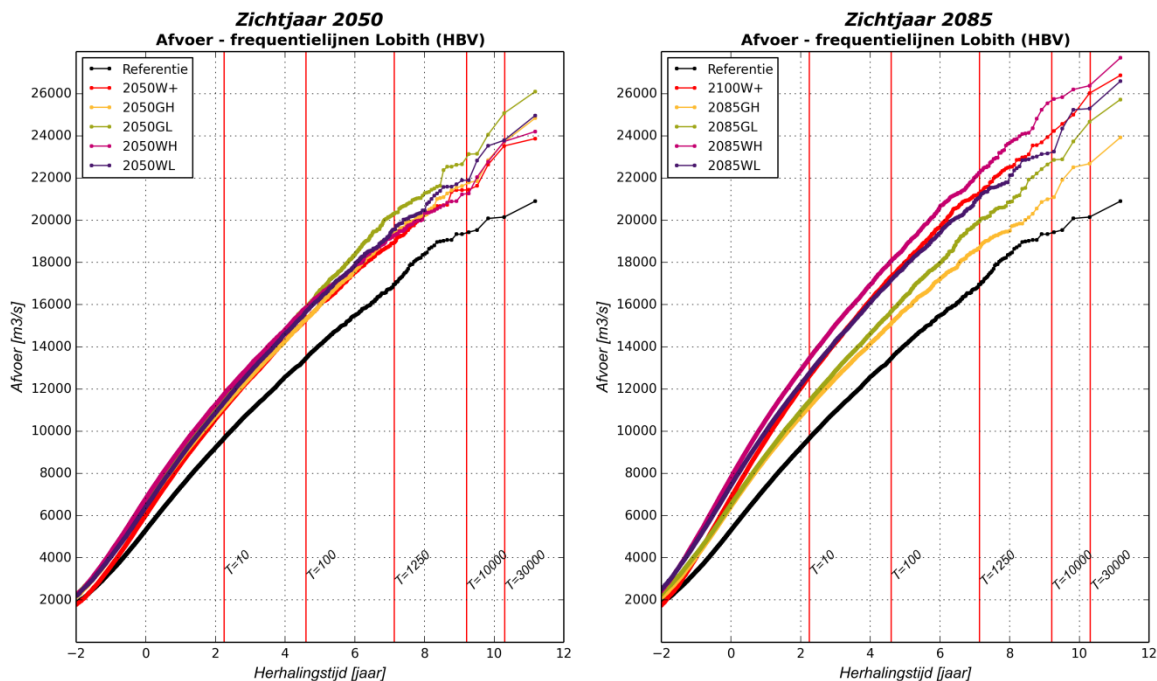
Allereerst is verkend welke rivierafvoer naar Nederland door de stroomgebieden wordt gegenereerd. Daartoe is verondersteld dat het water in de rivier blijft, door uit te gaan van 'oneindig hoge dijken'. De hoeveelheid water die tot afstroming komt, na aftrek van verdamping en rekening houdend met sneeuwval en -smelt, volgt in grote lijnen wat met de 10-daagse neerslag gebeurt. Dat wil zeggen dat de hoogwaterafvoeren in de KNMI'14 scenario's elkaar in 2050 maar weinig ontlopen. In 2085 leiden de warme scenario's echter tot verder toenemende hoge rivierafvoeren, terwijl de gematigde (G) scenario's nog maar weinig verandering laten zien ten opzichte van de situatie in 2050.

Enigszins intrigerend is dat het gematigde scenario G_L in 2050 de grootste rivierafvoeren genereert, zowel op de Rijn als de Maas. Hiervoor is al vermeld dat de natte (na)zomers in dit scenario mogelijk een verklaring vormen voor de grote 10-daagse neerslagsommen in dit scenario. Bij de rivierafvoeren wordt dit verschil misschien nog versterkt doordat deze nazomerregens ertoe leiden dat het stroomgebied ook relatief snel met water verzadigd raakt, waarna extra neerslag sneller tot extreme afvoer leidt.

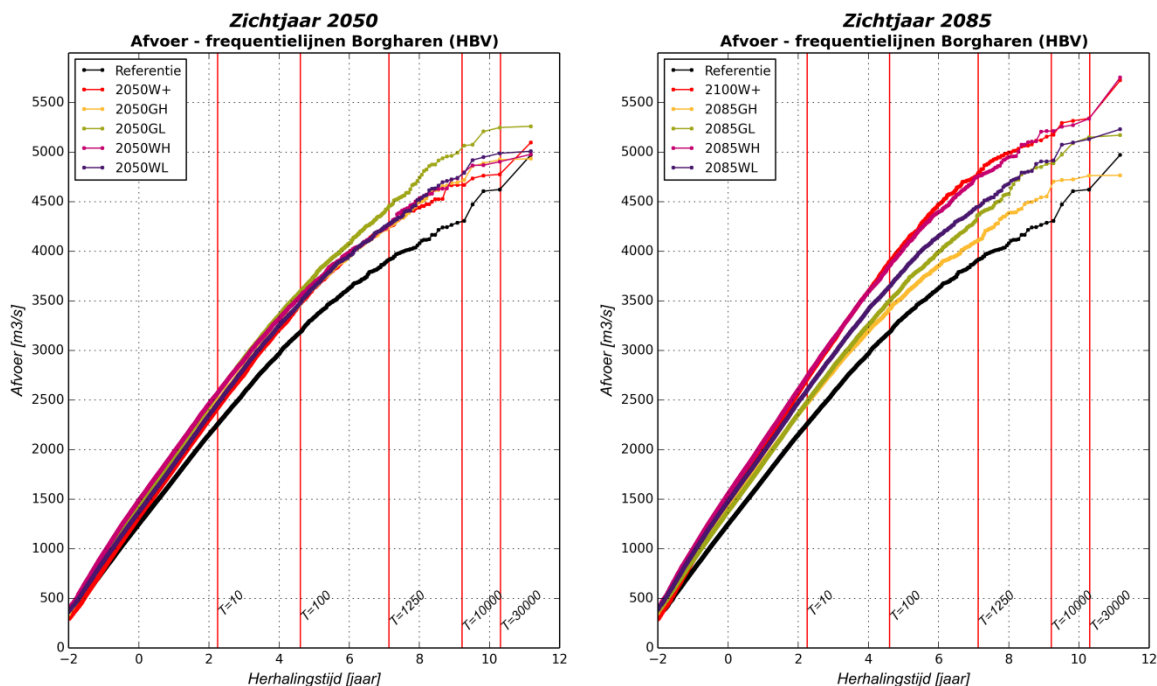
Rijn

Bij de Rijn zien we dat bij Lobith de KNMI'14 scenario's leiden tot een flinke toename van de mogelijke afvoeren in 2050. Waar nu met een kans van 1: 1250 per jaar circa $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot afvoer kan komen, kan dat in 2050 in 3 scenario's $19.000 \text{ m}^3/\text{s}$ worden en in scenario G_L zelfs $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Let wel: het gaat hier dus om de hoeveelheid water die tot afvoer kan komen, dat wil niet zeggen dat deze afvoer Nederland kan bereiken (zie daartoe het volgende hoofdstuk!).

In 2085 lopen de scenario's voor de extreme rivierafvoeren verder uiteen, van 19.000 m³/s in het G_H-scenario tot 22.000 m³/s in het W_H-scenario voor een 1: 1250 gebeurtenis.



Figuur 6 Ontwikkeling van de relatie tussen overschrijdingsfrequentie en mogelijke afvoer bij Lobith in de Rijn in de KNMI'14 scenario's in 2050 (links) en 2085 (rechts).



Figuur 7 Ontwikkeling van de relatie tussen overschrijdingsfrequentie en mogelijke afvoer bij Borgharen in de Maas in de KNMI'14 scenario's in 2050 (links) en 2085 (rechts).

Maas

Voor de Maas zien we een zeer vergelijkbaar beeld. Waar de 1:1250 per jaar afvoer nu op circa 3900 m³/s wordt berekend, loopt deze de KNMI'14 scenario' op tot 4250 à 4300 m³/s in drie scenario's en zelfs tot 4450 m³/s in scenario G_L in 2050.

In 2085 gaan de scenario's weer uiteen lopen, waarbij de extreem hoge hoogwaterafvoeren in W_L en W_H doorstijgen tot circa 4450 respectievelijk 4750 m³/s.

Alles overziend kunnen we vaststellen dat in alle KNMI'14 scenario's de 1:1250 hoogwaterafvoer in 2050 sterk toeneemt. Ook lijkt de onzekerheid over de hoogwaterafvoer op middellange termijn iets kleiner te zijn geworden; de afvoeren worden groter doordat het in alle scenario's in sommige seizoenen (veel) natter wordt.

In 2085 gaan de scenario's voor de rivierafvoeren verder uiteenlopen, waarbij W_H (KNMI'14) nog boven W₊ (KNMI'06) uitkomt. Voor de langere termijn is de onzekerheid over de ontwikkeling dus onverminderd groot, mede omdat de klimaatontwikkeling niet langer (ten onrechte) lineair is verondersteld.

Komen die afvoeren wel in Lobith en Borgharen aan?

Hierboven was sprake van de hoeveelheden water die met een bepaalde (zeer kleine) kans van optreden in de verschillende klimaatscenario's tot afvoer kunnen komen. Deze hoeveelheden zijn berekend met het neerslag-afvoermodel (HBV). Of die hoeveelheden ook de grens van Nederland kunnen bereiken hangt tevens af van hoe de afvoergolven zich voortplanten door de rivieren, en of er geen grootschalige overstromingen optreden bovenstrooms van de landsgrens (aftopping); met een dempend effect tot gevolg.

Mogelijk ten overvloede wordt hier opgemerkt dat de hieronder gepresenteerde wijze van extreme afvoeren berekenen in de afgelopen decennia is ontwikkeld, maar pas zeer recentelijk is geaccepteerd. Tevens wordt opgemerkt dat hier modelresultaten worden gepresenteerd voor rivierafvoeren bij verschillende klimaatscenario's die niet zomaar voor toetsing (Wettelijk ToetsInstrumentarium) of ontwerp (OntwerpInstrumentarium 2014) mogen worden gebruikt. Zowel voor toetsing als ontwerp wordt namelijk nog op een specifieke wijze rekening gehouden met allerlei extra onzekerheden, waaronder onzekerheden over de grootschalige toepassing van zandzakken of vergelijkbare tijdelijke beschermingsmaatregelen in Duitsland.

Rijn

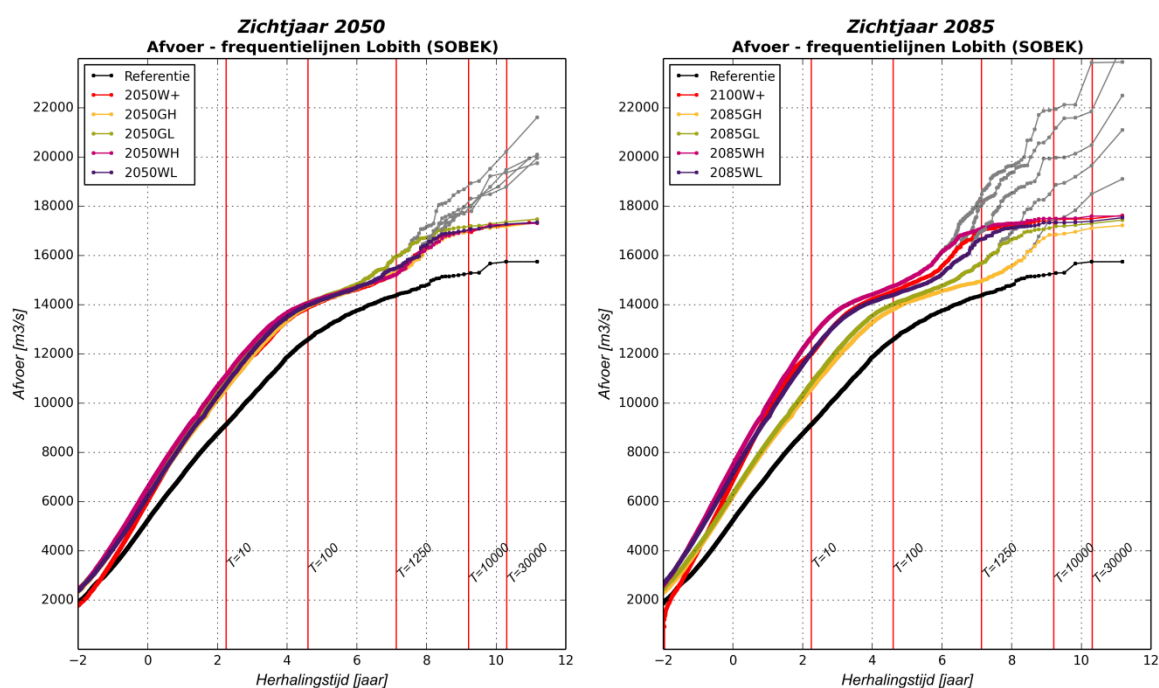
Voor de Rijn is het effect van overstromingen in Duitsland verkend met gebruikmaking van het hydraulisch model SOBEK. Voor de Rijn geldt namelijk dat al in Zuid-Duitsland grootschalige overstromingen kunnen optreden, doordat de dijken daar zijn berekend op waterstanden met een kans van voorkomen van circa 1: 100 tot 1: 200 per jaar. Meer stroomafwaarts kan de Rijn vervolgens nog grote gebieden onder doen lopen in Nordrhein-Westfalen in het traject tussen ongeveer Bonn en de Nederlandse grens. Hier zijn de dijken ontworpen op een 1:200 tot 1:500 per jaar hoogwater. De aldus beschermde gebieden kunnen vollopen tot ze geheel gevuld zijn. Daarna stroomt het water weer door, of terug. Dit alles is met het SOBEK-model gesimuleerd, uitgaande van werkelijke dijkhoogten. Tenslotte kunnen op de laatste 20 km voor de grens nog dijken overlopen, waarna het water achter de dijken naar Nederland stroomt. Dat is dan dus niet via de Rijn bij Lobith ons land in, maar ernaast. Dit effect is ook in de hydraulische analyses voor de KNMI'14 scenario's verdisconteerd.

Het effect van het rekening houden met overstromingen in Duitsland is te zien in Figuur 8. Daaruit blijkt dat ook al in de huidige situatie ('referentie') de afvoer effectief wordt afgetopt vanaf circa 14.000 m³/s. Afvoeren boven de 16.000 m³/s worden in de referentiesommen voor het huidige klimaat niet verwacht⁴.

Waar de scenario's dus minder ver uiteenlopen qua in de toekomst maximaal te verwachten werkelijke Rijnafvoer te Lobith, doen ze dat echter juist zeer sterk qua toekomstige kans van voorkomen. In alle scenario's gaat de kans van voorkomen van een afvoer van ruim 12.000 m³/s (overeenkomend met de hoogwaters van 1993 en 1995) van 1: 100 per jaar naar circa 1:30 per jaar in 2050; in scenario's W_L en W_H gaat die in 2085 zelfs naar vaker dan 1: 10 per jaar. De tot nu toe

⁴ De gepresenteerde berekeningsresultaten zijn 'sec' berekeningsresultaten van het GRADE-instrumentarium. Er is hier geen rekening gehouden met onzekerheden, zoals bij de normstelling en toetsing van dijken wel gebruikelijk (men denke aan het plaatsen van zandzakken op de Duitse dijken). De gepresenteerde getallen moeten dan ook in deze context worden geïnterpreteerd: als verkenning van de mogelijke gevolgen van klimaatverandering.

maatgevende afvoer van 16.000 m³/s (waarop het Ruimte voor Rivieren-programma is afgestemd) gaat van een berekende kans van voorkomen van kleiner dan 1: 30.000 per jaar nu, naar circa 1: 2000 in 2050, en naar ongeveer 1: 500 in 2085 in scenario's W_L en W_H. Frequentere hoogwaters betekent ook een toename van de overstromingsrisico's, doordat de kans op het doorbreken van dijken toeneemt als ze veel vaker zwaar belast worden⁵.



Figuur 8 Ontwikkeling van de relatie tussen (overschrijdings)frequentie van voorkomen van hoogwaters op de Rijn (Lobith) in de vier KNMI'14 scenario's en het KNMI'06 W+-scenario in de tijd, rekening houdend met overstromingen in Duitsland. In grijs de afvoeren als geen overloop van de dijken op de laatste 20 km voor de grens wordt verondersteld.

Op grond van deze analyses kan het hoogwaterbeleid (Deltaprogramma e.a.) zich voor de toekomst oriënteren op

Tabel 1. Daarbij wordt er echter nogmaals nadrukkelijk op gewezen dat voor het toetsen en ontwerpen van dijken echter ook nog rekening moet worden gehouden met onzekerheden⁶. Uit de tabel kan worden afgeleid dat voor de dijken langs de Waal en Nederrijn, waar normen van overwegend 1: 10.000 en 1: 30.000 zijn voorgesteld, met vrij grote zekerheid al in 2050 op een afvoer van circa 17.000 m³/s kan worden gerekend.

⁵ De nieuwe hoogwaterbeschermingsnormen gaan uit van 'overstromingskansen' waarmee de kans op falen van de waterkering wordt bedoeld.

⁶ Daarvoor zijn het Wettelijk ToetsInstrumentarium (WTI) en het OntwerpInstrumentarium (OI2014) in ontwikkeling, waarin per locatie exacte getalswaarden voor Hydraulische Belastingniveaus worden afgeleid.

Tabel 1 Berekende afvoeren (in m³/s, afgerond op 100-tallen) per herhalings-tijd in de vier KNMI'14 scenario's in vergelijking met de referentie en het 'oude' (KNMI'06) W+-scenario, voor de Rijn. (Vet: de 'oude overschrijdskansnorm'). NB: Deze afvoeren kunnen niet zomaar voor toetsen of ontwerpen worden gebruikt (zie de tekst).

Herhalings-tijd (jaren)	Ref.	2050GL	2050GH	2050WL	2050WH	2050W+	2085GL	2085GH	2085WL	2085WH	2085W+
10	9100	10900	10600	10800	11100	11000	10800	10600	12000	12700	11700
30	10900	12900	12500	12700	13000	12400	12800	12400	13700	14100	13400
100	12600	14100	13900	14000	14100	13900	14000	13800	14400	14800	14300
300	13600	14700	14500	14500	14600	14500	14600	14400	15000	15600	15000
1000	14300	15700	15200	15400	15100	15100	15500	14900	16400	17000	16300
1250	14400	15900	15300	15500	15200	15300	15700	14900	16700	17100	16500
3000	14800	16700	16200	16400	16300	16400	16600	15600	17100	17300	17000
10000	15300	17200	17000	17000	17000	16900	17200	16800	17300	17500	17500
30000	15700	17300	17200	17200	17300	17200	17300	17000	17400	17500	17600

Maas

Voor de Maas is een hydraulische analyse zoals hierboven voor de Rijn beschreven nog niet op deze wijze gedaan. De geografie van het Maasdal verschilt sterk van die van de Rijn. De hierboven voor de Rijn beschreven fenomenen zijn voor de Maas naar de huidige inzichten veel minder belangrijk tot vrijwel verwaarloosbaar, omdat de Maas tot Luik door een kloofdal stroomt. Ze gaan pas echt een rol van betekenis spelen ten noorden van Maastricht; dat wil zeggen nadat een afvoergolf de grens al is gepasseerd.

Het ExpertiseNetwerk Waterveiligheid (ENW) heeft geadviseerd de Maas alsnog op vergelijkbare wijze hydraulisch te modelleren, maar ook om dit fenomeen van aftopping specifiek voor de bedijkte Maas verder te onderzoeken.

Vooralsnog wordt voor de Maas uitgegaan van de berekeningsresultaten zonder overstromingen in België. De voor het hoogwaterbeleid relevante getallen worden in onderstaande tabel gegeven. Voor de Limburgse Maas zijn afvoeren met een kans van voorkomen van 1: 300 tot 1:1000 per jaar relevant, voor de bedijkte Maas afvoeren met een kans van voorkomen van 1: 10.000. De afvoer met een kans van 1: 300 loopt op van ruim 3500 m³/s naar ongeveer 3900 m³/s in 2050. De 1: 10.000 afvoer die volgens de simulaties nu ongeveer 4350 m³/s is, zou kunnen toenemen tot ruim 4700 m³/s in 3 scenario's en zelfs 5000 m³/s in scenario G_L. Maar voor de bedijkte Maas is dus nog geen rekening gehouden met overstromingen langs de onbedijkte Maas.

Tabel 2 Berekende afvoeren (in m³/s, afgerond op 50-tallen) per herhalingstijd in de vier KNMI'14 scenario's in vergelijking met de referentie en het 'oude' (KNMI'06) W+-scenario, voor de Maas. (Vet: de 'oude overschrijdingskansnorm'). NB: Deze afvoeren kunnen niet zomaar voor toetsen of ontwerpen worden gebruikt (zie de tekst).

Herhalings-tijd (jaren)	Ref.	2050G _L	2050G _H	2050W _L	2050W _H	2050W+	2085G _L	2085G _H	2085W _L	2085W _H	2085W+
10	2250	2550	2500	2450	2550	2400	2500	2450	2600	2750	2600
30	2750	3100	3000	3000	3100	2950	3000	2950	3150	3300	3200
100	3200	3600	3450	3500	3550	3450	3500	3400	3650	3850	3750
300	3550	4000	3850	3900	3900	3850	3900	3750	4050	4300	4200
1000	3850	4350	4200	4200	4200	4200	4250	4050	4400	4700	4550
1250	3900	4450	4250	4250	4250	4250	4350	4100	4450	4750	4650
3000	4100	4750	4500	4500	4550	4450	4600	4400	4700	4950	4850
10000	4350	5000	4700	4750	4750	4650	4900	4600	4900	5200	5050
30000	4600	5200	4850	4950	4900	4850	5050	4750	5100	5350	5200

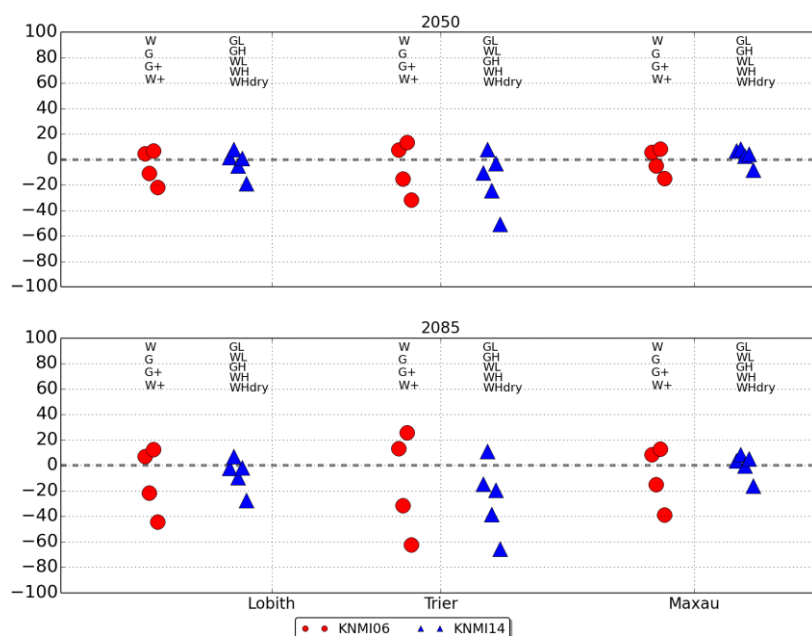
Wat gebeurt er met de laagwaterperioden?

Perioden met lage rivierafvoeren kunnen problemen veroorzaken zoals een geringe bevaarbaarheid van de grote rivieren, een langduriger of ernstiger zoutindringing via de Nieuw Waterweg, toenemende zoutgehaltes in de rivieren zelf, en tekort aan water om alle regio's van oppervlaktewater te kunnen voorzien.

Om de implicaties van de nieuwe klimaatscenario's voor dergelijke problemen te kunnen beoordelen, is in beeld gebracht hoe de laagste afvoeren per jaar zich ontwikkelen. Daartoe is berekend wat er gebeurt met de afvoer gedurende de 7 aaneengesloten dagen per jaar dat deze het laagst is. Dit geeft een eerste indruk van de mogelijke omvang van laagwaterproblemen, ook al hangen die in de praktijk mogelijk meer samen met de duur dat een bepaalde drempelwaarde van de afvoer wordt onderschreden.

Rijn

Voor de Rijn (Figuur 9) in Maxau zien we in vier van de vijf KNMI'14-scenario's nauwelijks een afname van de afvoer in laagwaterperioden, noch in 2050 noch in 2085. Alleen voor het scenario $W_{H,dry}$ wordt een geringe afname berekend van 10 (2050) tot ruim 15% (2085). De omvang en diversiteit van het achterland en de buffering door de Bodensee, die als natuurlijk stuwmeer functioneert, kunnen een verklaring zijn voor de geringe verschillen in vier van de vijf scenario's op deze locatie.



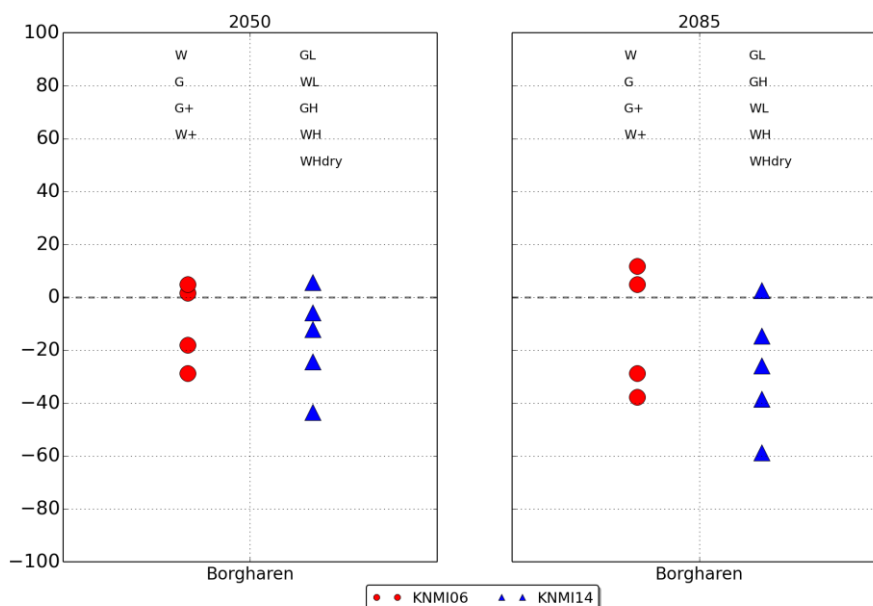
Figuur 9 Procentuele afname van de rivierafvoer (Rijn te Maxau (rechts) en Lobith (geheel links), Moezel te Trier (midden)) die gedurende de 7 aaneengesloten dagen met de laagste afvoer optreedt in de KNMI'14 scenario's en ter vergelijking de KNMI'06 scenario's. Beide ten opzichte van huidig (0-lijn).

Voor de Moezel worden voor Trier namelijk wel lagere afvoeren berekend in vier van de vijf KNMI'14 scenario's. In 2050 varieert de verandering van de lage afvoeren hier tussen +5 en -55% en in 2085 tussen +10 en -65%.

De berekeningsresultaten voor Lobith laten zien dat de effecten voor de beide hiervoor beschreven locaties worden vermengd, waarbij de Rijn zelf meer gewicht in de schaal legt dan de Moezel. Dat uit zich in veranderingen van de lage afvoeren tussen +5 en -20% in 2050 en tussen +5 en -30% in 2085.

Maas

De Maas kent nu al een in de tijd veel variabelere afvoerregime dan de Rijn. De invloed van veranderingen in neerslag en verdamping tikt dan ook veel harder door. In Figuur 10 is te zien dat alleen in scenario GL de laagwaterafvoer nauwelijks afneemt, terwijl die in de andere scenario's afneemt met 5 tot 45% in 2050 en met 15 tot 60% in 2085.



Figuur 10 Procentuele afname van de rivierafvoer (Maas te Borgharen) die gedurende de 7 dagen met de laagste afvoer optreedt in de KNMI'14 scenario's en ter vergelijking de KNMI'06 scenario's. Beide ten opzichte van huidig (0-lijn).

Belangrijkste verschillen ten opzichte van eerdere studies

De KNMI'14 scenario's geven voor de hoogwaterafvoeren in 2050 het volgende beeld in vergelijking met de KNMI '06 scenario's: het wordt nu in de meeste scenario's natter. Dat vertaalt zich in iets hogere hoogwaterafvoeren op Rijn en Maas en in iets minder onzekerheid over de hoogwaters die in 2050 met een bepaalde kans van optreden kunnen worden verwacht. Voor het hoogwaterbeschermingsbeleid (en het Deltaprogramma) betekent dat een steviger houvast voor beleidsvoorbereiding.

Voor de langere termijn, 2085, divergeren de scenario's echter sterk, zodat de onzekerheden over de rivierafvoeren waarmee na 2050 rekening moet worden gehouden groot blijven. De KNMI'14 scenario's lopen sterk uiteen, en de W-scenario's wijzen op mogelijke rivierafvoeren die dicht bij die van het KNMI'06 W+-scenario liggen. Mocht de werkelijke ontwikkeling echter meer op een G-scenario lijken, dan wordt de hoogwateropgave nauwelijks tot niet groter dan deze al in 2050 is.

Doordat het GRADE-instrumentarium het mogelijk maakt voor de Rijn (beter) rekening te houden met overstromingen in Duitsland, zijn de berekende maximale rivierafvoeren voor de Rijn fysisch beter onderbouwd en daarmee een betere basis voor beleidsvoorbereiding. De aftopping leidt weliswaar tot minder extreme maximale afvoeren, maar wel tot veel frequenter voorkomende hoge afvoeren, die voor het overstromingsrisicobeleid eveneens zeer relevant zijn. De jaarlijkse kans op een overstroming hangt immers ook af van hoe vaak een dijk wordt belast door hoogwater.

De eerder voorziene laagwaterproblemen voor de Rijn lijken met de nieuwe scenario's echter minder ernstig. De Rijn heeft in dit verband baat bij de omvang en diversiteit van het stroomgebied en de buffering door grote meren; alleen in scenario $W_{H, dry}$ zien we forse afnames van de laagwaterafvoeren te Lobith. De Maas laat in vier van de vijf scenario's een significante afname van laagwaterafvoeren zien.



Deltares

PO Box 177
2600 MH Delft, The Netherlands
T +31 (0)88 335 82 73
info@deltares.nl
www.deltares.nl